

РОЗДІЛ I. КОМП'ЮТЕРНІ НАУКИ

УДК 004.4'236:004.9

DOI <https://doi.org/10.26661/2786-6254-2023-2-01>

ТРИРІВНЕВА ІЄРАРХІЧНА МОДЕЛЬ АДИТИВНОГО ВИРОБНИЦТВА З ВИКОРИСТАННЯМ ТЕХНОЛОГІЇ ЕЛЕКТРОДУГОВОГО ЗВАРЮВАННЯ

Анікін П. С.

аспірант

Національний університет «Запорізька політехніка»

вул. Жуковського, 64, Запоріжжя, Україна

orcid.org/0000-0001-6767-784X

anikinps@zntu.edu.ua

Шило Г. М.

доктор технічних наук

Запорізький національний університет

вул. Жуковського, 66, Запоріжжя, Україна

orcid.org/0000-0002-5020-6707

shilo.gn@gmail.com

Бастос Ф.

кандидат технічних наук

Федеральний університет Жуїз де Фора

вул. Жоузе Лоуренсо Келмер, Жуїз де Фора, Бразилія

orcid.org/0000-0001-9573-8996

flavia.bastos@ufff.br

Ключові слова: *електродугове зварювання; CAE системи; робототехніка; 3D моделювання, Abaqus.*

У наведеній статті висвітлено інноваційний підхід до проблеми адитивного виробництва, оснований на розробці та використанні тривимірної ієрархічної моделі, яка використовує технологію електродугового зварювання. Основною метою дослідження є створення оптимального процесу адитивного виробництва, при якому досягаються високі показники якості та технологічності виготовлених деталей. Проведено симуляцію процесу адитивного виробництва з вимогами до технологічності та якості отриманої деталі у вигляді її геометричних розмірів, залишкових напружень та збереження оптимальної швидкості виробництва. На основі вимог аналізу технологічності розроблено алгоритм процесу симуляції. Створено та проведено аналіз тривимірної ієрархічної системи автоматизованого керування робототехнічною платформою адитивного виробництва у якій застосовується зворотній зв'язок з використанням телекомунікаційних пристроїв у вигляді камери та лазерних датчиків для контролю за температурним розподілом під час процесу виробництва. Розглянуто окремо рівні ієрархічної моделі: створення валику, створення шару та створення стінки у процесі 3D-друку деталі. Визначено вхідні дані матеріалу для роботи з системою автоматизованого керування робототехнічною платформою з використанням технології електродугового зварювання та процесу симуляції цього виробництва. Отримано дані для можливості генерації автоматизованої програми для керування роботом під час процесу

адитивного виробництва. Також було проведено аналіз можливостей симуляції тривимірного друку з використанням технології електродугового зварювання в системах САЕ (Computer-Aided Engineering). Це дозволило визначити вплив температурних параметрів, механічних навантажень та зміни траєкторії руху під час створення деталі. На підставі отриманих даних встановлено значення залишкових напружень та виявлені дефекти, що допомагає покращити якість та надійність вироблених деталей в адитивному виробництві. Отримані результати досліджень надають актуальну та корисну інформацію для інженерної спільноти, що працює в галузі адитивного виробництва та робототехніки.

WIRE ARC ADDITIVE MANUFACTURING THREE LEVEL HIERARCHICAL MODEL

Anikin P. S.

Postgraduate Student

National University "Zaporizhzhya Polytechnic"

Zhukovskoho str., 64, Zaporizhzhia, Ukraine

orcid.org/0000-0001-6767-784X

anikinps@zntu.edu.ua

Shilo G. M.

Doctor of Technical Sciences

Zaporizhzhia National University

Zhukovskoho str., 66, Zaporizhzhia, Ukraine

orcid.org/0000-0002-5020-6707

shilo.gn@gmail.com

Bastos F.

Doctor of Philosophy

Juiz de Fora Federal

Jose Lourenco Kelmer str., Juiz de Fora, Brazil

orcid.org/0000-0001-9573-8996

flavia.bastos@ufjf.br

Key words: *WAAM, CAE systems, Robotics, 3D modeling, Abaqus.*

The article presents an innovative approach to the issue of additive manufacturing, based on the development and utilization of a three-tier hierarchical model that employs arc welding technology. The primary objective of this research is to create an optimal process for additive manufacturing, ensuring high standards of quality and technological efficiency in the produced components. The study involves a comprehensive simulation of the additive manufacturing process, with a particular focus on meeting requirements for the geometric dimensions, residual stresses, and the preservation of an optimal production speed for the manufactured components. To achieve this goal, an algorithm for the simulation process has been developed based on the analysis of technological requirements. The article also introduces and analyzes a three-dimensional hierarchical system for the automated control of a robotic platform in additive manufacturing. This system incorporates feedback mechanisms using telecommunications devices such as cameras and laser sensors to monitor temperature distribution during the production process. This significantly enhances the quality and reliability of the manufacturing process. The hierarchical model is dissected into specific levels: the creation of a roll, the generation of a layer, and the development of a wall during the 3D printing of the component. Furthermore, input data regarding the material is determined for the operation of the automated control system of the robotic platform using arc welding technology and the simulation process. Data have been obtained that enable the generation of automated programs for robot control during the additive manufacturing process. Additionally, an analysis

of the capabilities of three-dimensional printing simulation using arc welding technology in CAE (Computer-Aided Engineering) systems was conducted. This analysis helps identify the impact of temperature parameters, mechanical loads, and changes in the movement trajectory during component creation. Based on the data collected, the values of residual stresses and defects are established, contributing to the enhancement of the quality and reliability of the manufactured components in additive manufacturing. The findings of this research provide relevant and valuable insights for the engineering community working in the fields of additive manufacturing and robotics.

Вступ. Процес адитивного виробництва з кожним днем стає більш використовуваним як серед гігантів технологічного промислу так і серед індивідуальних виробників. Процес друку з допомогою металу відкриває перед людством нові можливості більш швидкого, точного та досконалого створення необхідних компонентів деталей виробів. Автоматизація процесу та його поліпшення – одні з сучасних над-завдань, що мають бути розглянуті та розв’язані наукою нашого часу. Теоретичні знання та практичні експерименти щодня наближають нас до створення нових висот сучасних конвенцій. Використання лазерних теплових датчиків та теплокамер для контролю процесу розповсюдження тепла, а також – різних автоматизованих систем охолодження прискорює процес доповнення створення загальної автоматизованої системи з використанням технології телекомунікацій для контролю за процесом виробництва 3Д друку з використанням технології електродугового зварювання. Симуляція виробництва з використанням подібних систем допомагає пришвидшенню та перевірці можливості їх створення, а також зменшення вартості виробу та самої системи.

Аналіз попередніх досліджень і публікацій. З попередніх досліджень було виявлено [1–3], що можливості існуючих адитивних технологій тривимірного друку металевих виробів потребують значних покращень у плані автоматизації систем. Встановлення та використання теплових камер а також лазерних датчиків для контролю системи охолодження й досі не мають широкого застосування та детального розгляду [4]. Поєднанні з новітніми системами охолодження для адитивного виробництва [5] за допомогою засобів телекомунікації вони дозволяють прискорити процес друку та автоматизувати його. Також для більш якісного виробництва вже проводяться експерименти щодо інкорпорації таких мульти-сенсорних систем, що можуть здобувати дані напруги, сили струму, звуку, інтенсивності світла, радіо частот та температурних даних [6].

Однією з проблем процесу адитивного виробництва з використанням електродугового зварювання є процес перекриття валиків [7]. Геометричні розміри самого валику визначається через напругу, силу струму, швидкість подачі матеріалу, та швидкість руху сопла [8].



Рис. 1. Процес адитивного виробництва з використанням електродугового зварювання на ТОВ «Тріада ЛТД Ко»

Для попереднього розрахункового етапу процесу друку використовуються програми симуляцій [9]. За допомогою цих програм можна проводити температурний аналіз розповсюдження тепла, а також структурний аналіз для виявлення залишкових напруг. Для визначення теплового розповсюдження на поверхні під час виробництва та симуляції процесу зварювання використовується рівняння розповсюдження тепла або модель джерела тепла Голдаку [10].

$$q_{f/r} = \frac{6\sqrt{3}f_{f/r}Q}{abc\pi\sqrt{\pi}} e^{-\frac{3x^2}{a^2}} e^{-\frac{3y^2}{b^2}} e^{-\frac{3z^2}{c^2}}$$

де $Q=nVI$ це розповсюдження енергії, що залежить від току, напруги та коефіцієнту ефективності. Величини abc визначаються розміром розповсюдження тепла у еліпсоїдній формі. А f – часткові фактори кількості тепла, що вводиться на передній та задній квадрати моделі. Та $f_r+f_f=2$.

Мета роботи. Метою роботи є розробка тривірневої ієрархічної моделі адитивного виробництва з використанням технології електродугового зварювання, проведення симуляції можливості її функціонування та прорахунок необхідної апаратури для проведення реального експерименту. Перевірка можливості існування та роботи даної системи. Інкorporація телекомунікаційних лазерних датчиків тепла та теплокамери до роботизованої системи. Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні задачі:

– створити моделі валиків на основі заданих параметрів;

- встановити можливість використання необхідних телекомунікаційних пристроїв пов'язаних з тепловими датчиками;

- провести симуляцію тривірневої ієрархічної моделі адитивного виробництва з використанням електродугового зварювання;

- встановити можливість проведення подальшого практичного експерименту виходячи з отриманих даних;

- на основі отриманих даних встановити можливість початку процесу створення автоматизованої програми для процесу адитивного виробництва з використанням електродугового зварювання.

Ієрархічна модель включає в себе три рівні – валик, шар та стінка. На кожному з рівнів необхідно розглянути геометричні та фізичні властивості, що змінюються відповідно до ієрархічної площини. Так наприклад на другому рівні додаються проблеми топології та перекриття валиків. На третьому – перегрівання всієї конструкції, складні геометричні форми, кривизна вертикальних поверхонь, відповідність нанесення шарів та їх топологія.

Викладення основного матеріалу і аналіз отриманих результатів. Для вдосконалення процесу виробництва за допомогою 3D-друку з використанням технології електродугового зварювання, його автоматизації та зменшення часу підготовки та поліпшення алгоритму вироблення необхідної деталі запропоновано тривірневу ієрархічну модель [11]. Кожен з рівнів моделі буде розглянуто окремо згідно з наданими даними, проведено симуляцію та відповідно до отриманих результатів створено наступний рівень. Після проведення симуляції останнього рівня буде визначено доцільність використання обраних показників для подальшого виробництва на основі вже проведеної симуляції.

Безпосередньо перед початком процесу, необхідно отримати проект бажаної деталі. Для експерименту було запропоновано простий варіант виробу прямокутної форми з розмірами: ширина 10мм, висота 5 мм. Матеріал виробу – алюміній. На підставі отриманих даних було обрано провести симуляцію з використанням двох геометрично відмінних валиків. Перший проект симуляції буде названо «малий» через менший розмір зварювального валику. Відповідно, другий проект – «великий».

Для початку процесу проведення симуляції першого рівня тривірневої ієрархічної моделі з використанням електродугового зварювання вводяться геометричні дані «базис» на якій безпосередньо буде відбуватися процес колокації зварювальних валиків, тобто процес адитивного виробництва. З огляду на заданий розмір фінального виробу було обрано два варіанти розміру валиків з шириною 4 мм, та 6 мм рис. 3.

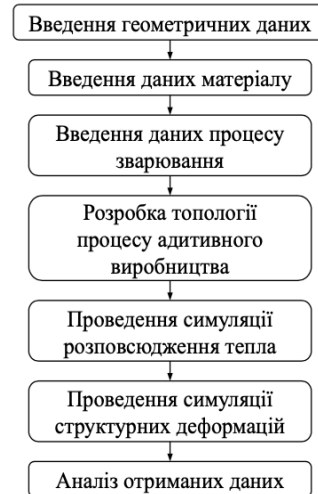


Рис. 2. Алгоритм проведення симуляції одного з рівнів тривірневої ієрархічної моделі адитивного виробництва з використанням електродугового зварювання

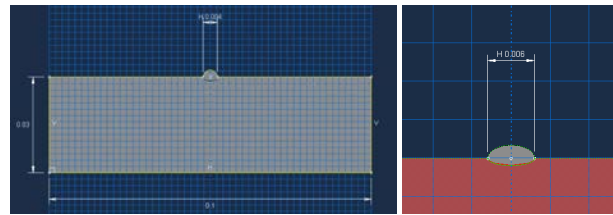


Рис. 3. Геометричні властивості бази та валику «малого» та «великого» типів

Відповідно до вже існуючих досліджень [12–15] щодо впливу фізичних показників для контролю висоти та ширини валику було встановлено відповідні показники. Розмір бази відповідно до розмірів валиків становить 30 мм висоти і 100 мм ширини, рис. 3. Для процесу можна використовувати на вибір різні типи матеріалів як залізо, алюміній або його сплав, що може бути використано для порівняльних характеристик міцності вже виробленої деталі, а також для аналізу розповсюдження тепла у процесі виробництва. Для нашого виробу матеріал вже задано заздалегідь – алюміній. Властивості матеріалу бази та валику вводяться окремо, так як показники міцності та залишкових напружень бази після виробництва для нас не мають великого значення і безпосередній процес дислокації валиків на поверхню бази викликає відмінні фізичні реакції в обох відповідно.

Для поліпшення процесу виробництва та контролю температурного розповсюдження, як у процесі симуляції так і у процесі виробництва використовуються датчики виміру тепла [16] з телекомунікаційними функціями. Теплова

камера та лазерні датчики спрямовані безпосередньо на валик, що створюється, рис. 4. В нашому випадку встановлено, що після дислокації валику необхідно дочекатися падіння температури на 70 градусів [17] перед дислокацією наступного. Це превентивна міра для недопущення кумулятивного ефекту та перегріву всього процесу виробництва.

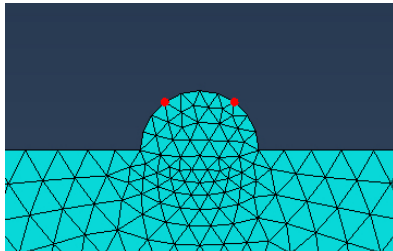


Рис. 4. Розташування лазерних датчиків для перевірки температури під час процесу адитивного виробництва з використанням електродугового зварювання

Безпосередній процес симуляції першого рівня тривимірної ієрархічної моделі адитивного виробництва з використанням технології електродугового зварювання показує розповсюдження тепла під час колокації валику, рис. 5, рис. 6, та на основі отриманих даних теплового аналізу встановлюються регіони залишкових напружень які найбільше можуть піддаватися деформаціям, рис. 5, рис. 6.

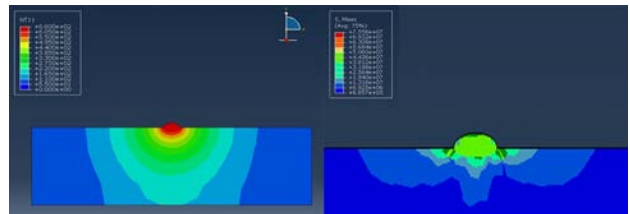


Рис. 6. Результати теплового аналізу та розповсюдження тепла і результати структурного аналізу та розповсюдження залишкових напружень «великого» валику першого рівня ієрархічної тривимірної моделі

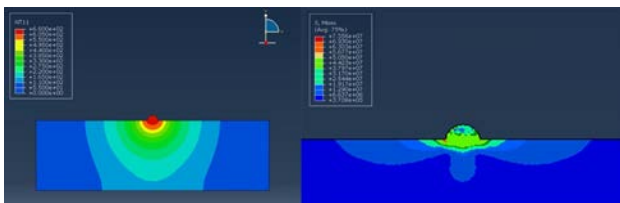


Рис. 5. Результати теплового аналізу та розповсюдження тепла і результати структурного аналізу та розповсюдження залишкових напружень «малого» валику першого рівня ієрархічної тривимірної моделі

Було виявлено, що з огляду на різні показники валиків тепло розповсюджується по різному, що в свою чергу, по різному впливає на залишкові напруження в кожному з представлених випадків.

Після огляду результатів першого рівня до розгляду береться другий рівень тривимірної ієрархічної моделі адитивного виробництва з використанням електродугового зварювання. Другий рівень, це – шар. На цьому рівні розглядаються геометричні властивості вже шару та проблеми розповсюдження тепла.

Таблиця 1

Властивості матеріалу для адитивного виробництва алюмінію

Теплопровідність		Густина ρ , kg/m ³	Пружність			Коефіцієнт теплового розширення		Питома теплоємність c , °
T, °	q, W/mC		T, °	σ , N/m ²	ν	T, °	ϵ , °	
300	164	2750	25	72.4e9	0.3	300	27e-006	900
500	194		500	63.5e9		500	27.4e-006	
700	210		700	56.1e9		700	27.7e-006	
770	220		770	50e9		770	28.3e-006	

Таблиця 2

Додаткові властивості матеріалу для адитивного виробництва алюмінію

Теплопровідність	Густина	Пружність		Коефіцієнт теплового розширення
q, W/m [°]	ρ	σ , N/m ²	ν	ϵ , °
204	2750	69e9	0.33	2.3e-005

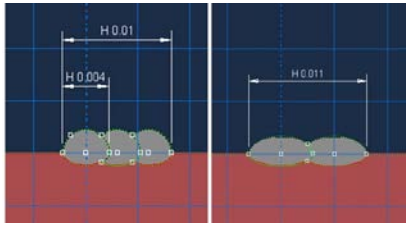


Рис. 7. Геометричні властивості «малого» та «великого» шарів.

Проблеми теплопровідності, якщо такі наявні, вирішуються за допомогою топології дислокації валиків, швидкості їх створення, а також моментом очікування визначеної температури охолодження задля проведення наступного кроку. В нашому випадку, було встановлено що оптимальна температура охолодження сягає 70 градусів цельсія, та під час процесу визначається за допомогою теплових лазерних датчиків та теплокамери, що з'єднана з системою безпроводною системою телекомунікації, та подає відповідні автоматичні сигнали до програми, яка контролює процес адитивного виробництва. Задля заданих розмірів необхідної деталі було обрано: у першому випадку виростити 3 валики, у другому випадку – 2, рис. 7.

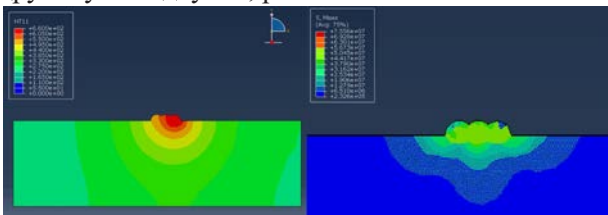


Рис. 8. Результати теплового аналізу розповсюдження тепла і результати структурного аналізу та розповсюдження залишкових напруг «малого» шару другого рівня ієрархічної тривимірної системи

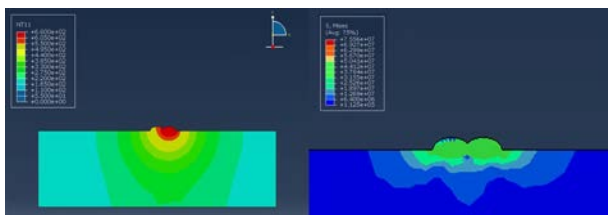


Рис. 9. Результати теплового аналізу розповсюдження тепла і результати структурного аналізу та розповсюдження залишкових напруг «великого» шару другого рівня ієрархічної тривимірної системи

Під час проведення теплового аналізу було виявлено, рис. 8, рис. 9, що під час дислокації трьох валиків за короткий термін температури

бази піднімається доволі швидко, проте у нормі допустимих величин. Однією з проблем під час виробництва може бути розповсюдження тепла на сусідні вже дислоковані валики, та їх деформація.

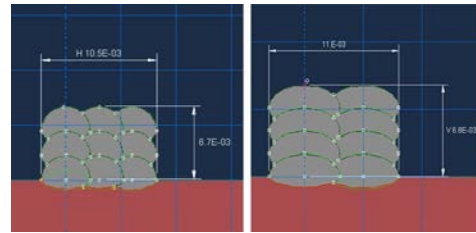


Рис. 10. Геометричні властивості «малої» та «великої» стінок

Проблема вирішується за допомогою контролю температури швидкістю виробництва, топологією, системою охолодження. Також з результатів структурного аналізу, рис. 8, рис. 9, видно, що розповсюдження залишкових напруг розподіляється поміж валиками на їх рівнях перекриттів. Більша кількість валиків – більша кількість перекриттів.

Структурною характеристикою третього рівню ієрархічної тривірневої моделі адитивного виробництва з використанням електродугового зварювання є стінка. На цьому етапі попередньо розглянуті параметри валику та шару застосовуються для поєднання і створення необхідної геометрії фінального виробу. Розглянувши необхідні геометричні параметри було визначено, що так як висота шарів типів малих та великих валиків відрізняється, тож і кількість нанесення шарів для отримання необхідної висоти теж буде відрізнятися. Для 5мм висоти необхідно 3 шари малих валиків та 4 шари великих валиків, рис. 10.

Процес розповсюдження тепла стає більш складним оскільки концентрація тепла з кожним кроком зростає та наближується до критичної. Для поліпшення процесу як і в попередніх рівнях використовуються лазерні датчики та тепла камера для контролю за температурою. Шлях топології було обрано односторонній для кожного шару, тобто після створення одного шару, робот повертається на початкові координати з відмінною висотою та починає наносити наступний шар, завдяки цьому тепло розповсюджується більш рівномірно. З симуляції теплового розповсюдження ми можемо побачити, що температура на останніх рівнях досягає майже критичної та при необхідності створення деталі більшої висоти наявна необхідність зупинки системи для більшого охолодження та уповільнення процесу адитивного виробництва, рис. 11.

Під час більше детального температурного огляду та заміру температурних даних у конкретній точці, що була обрана. В нашому випадку це

точка з'єднання бази та друкованої деталі. Було виявлено, що під час процесу адитивного виробництва температури в обох варіантах обраних валиків коливається у межах визначених величин, рис. 12. Однак під час друку варіанту з великими валиками мінімальна температура залишається меншою ніж у варіанту з малими.

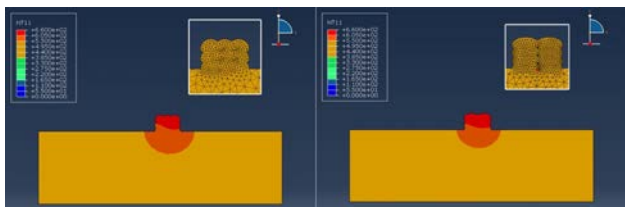


Рис. 11. Результати теплового аналізу розповсюдження тепла і точки заміру температури для графіків «малої» та «великої» стінок

Результати структурного аналізу дають можливість зрозуміти розташування залишкових напруг вже надрукованої деталі, рис. 13. Під час огляду стає зрозуміло, що за меншої кількості валиків мікроструктура деталі стає більш передбачуваною оскільки зменшується кількість сполучень поміж структурними елементами, тобто – валиками.

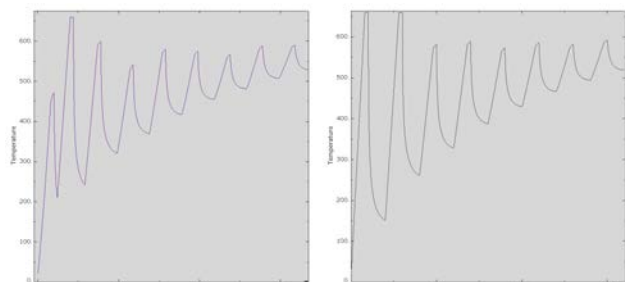


Рис. 12. Температурний аналіз надрукованої деталі «малим» і «великим» типами валиків

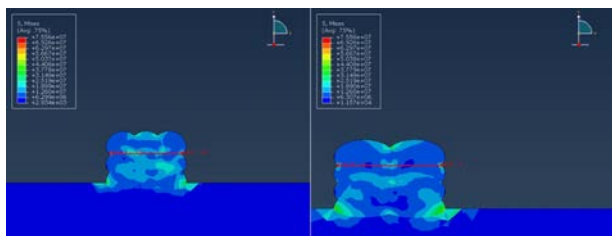


Рис. 13. Результати структурного аналізу та розповсюдження залишкових напруг у визначеному шляху для графіків «малої» та «великої» стінок

Для більш детального вивчення та аналізу залишкових напруг було обрано специфічні ділянки для отримання даних їх розповсюдження у деталі.

За результатами аналізу, рис. 14, з'ясовано, що при дислокації шару складаємого з трьох валиків, напруги розповсюджуються більш рівномірно в той час як при дислокації шару, що складається лише з двох валиків найбільша кількість залишкових напруг зосереджена в одному місці.

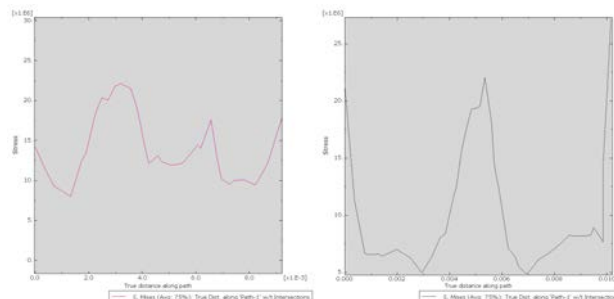


Рис. 14. Аналіз залишкових напруг у визначеному шляху надрукованої деталі «малим» та «великим» типами валиків

З отриманих даних під час симуляції стає зрозуміло, що обидві моделі обраних валиків підходять для процесу адитивного виробництва, зважаючи на потреби користувача, у вигляді часу виготовлення, сили струму, напруги, розповсюдження залишкових напруг, можна обрати, який саме тип остаточної деталі буде вироблено.



Рис. 15. Отримана деталь після фрезерної обробки

У нашому випадку було обрано другий тип, тобто тип з використанням «великих» валиків. Отримана деталь розміру 5 мм на 10 мм та товщиною 2мм після процесу адитивного виробництва та фрезерної обробки зображена на, рис. 15. Процес друку було проведено з використанням лазерних датчиків та теплокамери з'єднаних телекомунікаційною системою зворотнього зв'язку.

Висновки. В результаті проведених досліджень було створено та успішно проведено огляд можливості використання трирівневої ієрархічної моделі з використанням електродугового зварювання. Створено дві моделі валиків на основі заданих параметрів – «велику» і «малу» моделі. Успішно встановлено можливість використання телекомунікаційно пов'язаних з системою друку теплових лазерних датчиків та теплокамери, що

безпосередньо беруть участь у процесі адитивного виробництва. Після проведення симуляції було встановлено можливість подальшого практичного експерименту на основі отриманих даних та надруковано необхідну задану деталь.

Дискусія. На основі всіх отриманих даних з дослідження встановлено можливість початку процесу створення автоматизованої програми з використанням теплових телекомунікаційних датчиків для процесу адитивного виробництва з використан-

ням електродугового зварювання. У програмі автоматизації може бути використана розглянута нами тривимірна система, що має за мету спрощення вибору користувачем необхідних матеріалів, типів перекриття, топології, температурних режимів, геометрії різних ієрархічних рівнів в залежності від обраних параметрів. У подальших дослідженнях необхідно провести симуляцію більш складних геометричних структур, а також обрати необхідні типи теплових лазерних датчиків та теплокамер.

ЛІТЕРАТУРА

1. Harshita P. Applications of wire arc additive manufacturing (WAAM) for aerospace component manufacturing. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2023. № 127. URL: <https://doi.org/10.1007/s00170-023-11623-7>
2. Gardner L. Metal additive manufacturing in structural engineering – review, advances, opportunities and outlook. *Structures*. 2023. № 47. URL: <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2022.12.039>
3. Anikin P., Shila G., Kulykovskiy R., Molochkov D. Wire+arc additive manufacturing automation control system architecture. *Measuring and computing technology in technological processes*. 2020.
4. Kozamiernik N. WAAM system with interpass temperature control and forced cooling for near-net-shape printing of small metal components. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2020. № 110. URL: <https://doi.org/10.1007/s00170-020-05958-8>
5. Dash A., Squiers L., Avila J., Bandyopadhyay A. Influence of active cooling on microstructure and mechanical properties of wire arc additively manufactured mild steel. *Frontiers in Mechanical Engineering*. 2023. № 9. URL: <https://doi.org/10.3389/fmech.2023.1130407>
6. Pringle A. Open source arc analyzer: Multi-sensor monitoring of wire arc additive manufacturing. *HardwareX*. 2021. № 8. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ohx.2020.e00137>
7. Zhang J. The gap-filling overlapping model for wire and arc additive manufacturing of multi-bead components. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2022. № 123. URL: <https://doi.org/10.1007/s00170-022-10132-3>
8. Yildiz A. Wire arc additive manufacturing of high-strength low alloy steels: study of process parameters and their influence on the bead geometry and mechanical characteristics. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2020. № 108. URL: <https://doi.org/10.1007/s00170-020-05482-9>
9. Ling Y. A Heat Transfer Finite Element Model for Wire-Arc-Additive-Manufacturing Process. *Proceedings of the 8th International Conference on Fracture, Fatigue and Wear*. 2021.
10. Hwang. S. Numerical Simulation of Welding Residual Stress Distribution on T-joint Fillet Structure. *International Journal of Ocean System Engineering*. 2012. № 2. URL: <https://doi.org/10.5574/IJOSE.2011.2.2.082>
11. Anikin P., Shilo G., Kulykovskiy R., Molochkov. D. Automation control system of 3d printing robotic platform with implemented wire + arc welding technology. *Electrical Engineering and Power Engineering*. 2021. № 4. URL: <https://doi.org/10.15588/1607-6761-2020-4-4>
12. Dong H. Weld bead size prediction for arc additive manufacturing based on ACS-DBN. *Journal of System Simulation*. 2021. № 12. URL: <https://doi.org/10.16182/j.issn1004731x.joss.21-FZ0723>
13. Le V. Optimization of Weld Parameters in Wire and Arc-Based Directed Energy Deposition of High Strength Low Alloy Steels. *Advances in Technology Innovation*. 2023. № 8. URL: <https://doi.org/10.46604/aiti.2023.10658>
14. Muller J. WAAM of structural components-building strategies for varying wall thicknesses. *Welding in the World, Le Soudage Dans Le Monde*. 2023. № 67. URL: <https://doi.org/10.1007/s40194-023-01481-y>
15. Mao N. Forming optimization for WAAM with weaving deposition on curved surfaces. *International Journal of Mechanical Sciences*. 2023. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2023.108366>
16. Jorge V. Pyrometrical Interlayer Temperature Measurement in WAAM of Thin Wall: Strategies, Limitations and Functionality. *Metals – Open Access Metallurgy Journal*. 2022. № 12 URL: <https://doi.org/10.3390/met12050765>
17. Derekar K. Influence of interpass temperature on wire arc additive manufacturing (WAAM) of aluminium. *The 71st IAW Annual Assembly and International conference*. 2018.

REFERENCES

1. Harshita P. (2023). *Applications of wire arc additive manufacturing (WAAM) for aerospace component manufacturing*. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2023. № 127. Retrieved from: <https://doi.org/10.1007/s00170-023-11623-7>
2. Gardner L. (2023). *Metal additive manufacturing in structural engineering – review, advances, opportunities and outlook*. Structures. 2023. № 47. Retrieved from: <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2022.12.039>
3. Anikin P., Shila G., Kulykovskiy R., Molochkov D. (2020). *Wire+arc additive manufacturing automation control system architecture*. Measuring and computing technology in technological processes. 2020.
4. Kozamiernik N. (2020). *WAAM system with interpass temperature control and forced cooling for near-net-shape printing of small metal components*. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2020. № 110. Retrieved from: <https://doi.org/10.1007/s00170-020-05958-8>
5. Dash A., Squiers L., Avila J., Bandyopadhyay A. (2023). *Influence of active cooling on microstructure and mechanical properties of wire arc additively manufactured mild steel*. Frontiers in Mechanical Engineering. 2023. № 9. Retrieved from: <https://doi.org/10.3389/fmech.2023.1130407>
6. Pringle A. (2021). *Open source arc analyzer: Multi-sensor monitoring of wire arc additive manufacturing*. HardwareX. 2021. № 8. Retrieved from: <https://doi.org/10.1016/j.ohx.2020.e00137>
7. Zhang J. (2022). *The gap-filling overlapping model for wire and arc additive manufacturing of multi-bead components*. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2022. № 123. Retrieved from: <https://doi.org/10.1007/s00170-022-10132-3>
8. Yildiz A. (2020). *Wire arc additive manufacturing of high-strength low alloy steels: study of process parameters and their influence on the bead geometry and mechanical characteristics*. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2020. № 108. Retrieved from: <https://doi.org/10.1007/s00170-020-05482-9>
9. Ling Y. (2021). *A Heat Transfer Finite Element Model for Wire-Arc-Additive-Manufacturing Process*. Proceedings of the 8th International Conference on Fracture, Fatigue and Wear. 2021.
10. Hwang. S. (2012). *Numerical Simulation of Welding Residual Stress Distribution on T-joint Fillet Structure*. International Journal of Ocean System Engineering. 2012. № 2. Retrieved from: <https://doi.org/10.5574/IJOSE.2011.2.2.082>
11. Anikin P., Shilo G., Kulykovskiy R., Molochkov. D. (2021). *Automation control system of 3d printing robotic platform with implemented wire + arc welding technology*. Electrical Engineering and Power Engineering. 2021. № 4. Retrieved from: <https://doi.org/10.15588/1607-6761-2020-4-4>
12. Dong H. (2021). *Weld bead size prediction for arc additive manufacturing based on ACS-DBN*. Journal of System Simulation. 2021. № 12. Retrieved from: <https://doi.org/10.16182/j.issn1004731x.joss.21-FZ0723>
13. Le V. (2023). *Optimization of Weld Parameters in Wire and Arc-Based Directed Energy Deposition of High Strength Low Alloy Steels*. Advances in Technology Innovation, 2023. №8. Retrieved from: <https://doi.org/10.46604/aiti.2023.10658>
14. Muller J. (2023). *WAAM of structural components-building strategies for varying wall thicknesses*. Welding in the World, Le Soudage Dans Le Monde. 2023. № 67. Retrieved from: <https://doi.org/10.1007/s40194-023-01481-y>
15. Mao N. (2023). *Forming optimization for WAAM with weaving deposition on curved surfaces*. International Journal of Mechanical Sciences. 2023. Retrieved from: <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2023.108366>
16. Jorge V. (2022). *Pyrometrical Interlayer Temperature Measurement in WAAM of Thin Wall: Strategies, Limitations and Functionality*. Metals – Open Access Metallurgy Journal. 2022. № 12 Retrieved from: <https://doi.org/10.3390/met12050765>
17. Derekar K. (2018). *Influence of interpass temperature on wire arc additive manufacturing (WAAM) of aluminium*. The 71st IAW Annual Assembly and International conference. 2018.